

## 宇宙線発生仕組みを利用した新たな加速器の提案



松井隆太郎<sup>\*1</sup>  
Matsui Ryutaro



岸本 泰明<sup>\*1</sup>  
Kishimoto Yasuaki



福田 祐仁<sup>\*2</sup>  
Fukuda Yuji

### 1 はじめに

宇宙空間には、宇宙線と呼ばれる、高エネルギー粒子が存在している。このような高エネルギー宇宙線は、光速の99%以上の速度を有しており、主に、恒星が寿命を迎えたときに起こる超新星爆発にともなう衝撃波（無衝突衝撃波と呼ばれる）によって加速（＝衝撃波統計加速）された粒子であると考えられている（図1(a)）。近年のレーザー技術の進展により、レーザー光の高強度化・小型化が進み、物質に高強度のレーザー光を照射することで、地上においても、宇宙空間で見られるような衝撃波を発生させることが可能となった<sup>1)</sup>。

今回、筆者らのグループは、大規模計算機シミュレーションにより、水素クラスター（球形の固体水素）に高強度のレーザー光を照射した場合に、クラスター内部で衝撃波が生成・伝播し、最終的に光速の65%に相当する0.3 GeV（ギガ電子ボルト）のエネルギーをもった指向性の高い（方向の揃った）陽子線が発生することを発見した<sup>2)</sup>。この発見は、陽子線を光速近くまで加速することのできるレーザー駆動型のイオン加速器の実現につながる新たな知見であり、更に、高エネルギー宇宙線の起源を解明する研究の一助となることも期待される。本稿では、レーザー照射によりプラズマ中に生成した衝撃波を利用した、新しい高エネルギー陽子線発生機構について解説する。

### 2 高強度レーザー技術の進展とレーザー駆動型粒子加速

1985年に、チャープパルス増幅（CPA）法という、高強度かつ極短パルスのレーザー光を生成させる方法が発明された<sup>3)</sup>。現在、このCPA法を用いることで、ペタワット（ $PW=10^{15}$  W）級の高強度レーザーが実現可能となった。このような高強度レーザーを物質に照射することで、物質は、レーザーパルスの時間スケール（フェムト秒オーダー）でイオン化されて“高エネルギー密度プラズマ”となる。この際、プラズマ中の電子は光速に近い速度まで加速される（電子の相対論領域）。これにより、惑星中心での核融合反応、衝撃波による粒子加速、超高圧下での物質特性の変化といった、宇宙で起こっている高エネルギー密度現象を、地上で模擬して調べることが可能となった。

このような高エネルギー密度科学の重要なテーマの1つとして、レーザー駆動型の粒子加速（以下、「レーザープラズマ加速」）がある。これは、物質に前述のような高強度レーザーを照射することで、 $\mu\text{m}$ （マイクロメートル）の空間に発生する、 $10^{12}$  V/mに達する非常に強い電場を粒子加速に利用する手法である。例えば、この強度の電場で、電子を $1\mu\text{m}$ 加速させた場合、電子は $10^6$  eV（=MeV）のエネルギーを得ることが原理的に可能となる。すなわち、レーザープラズマ加速では、従来の大型加速器と比べて非常に効率よく粒子を加速できることが分かる（加

速勾配 $\sim 10^5$ 倍)。そのため、レーザープラズマ加速は、従来の大型加速器に代わる、次世代の低コスト・超小型の粒子加速器の候補の1つとして期待されている。

### 3 衝撃波加速

レーザープラズマ加速の手法でイオンを加速するために、これまでに様々な加速機構が提案されているが、そのうちの1つに衝撃波を利用した機構（以下、「衝撃波加速」）がある。衝撃波加速とは、プラズマ中を速度 $v$ で伝播する衝撃波が作る電場によって、衝撃波前方のイオンが衝撃波の2倍の速度 $2v$ で衝撃波伝播方向へ打ち出される（加速される）現象であり、エネルギーの良く揃ったイオンが得られることが特徴である。自然界では、前述のように、超新星爆発が“天然の粒子加速器”として、衝撃波を上手く利用して高エネルギー粒子を生成している（図1(a)）。

この“天然の粒子加速器”にヒントを得る形で、これまで、地上でも物質にレーザーを照射することでプラズマ中に類似の衝撃波を発生させ（図1(b)）、それによりエネルギーの揃ったイオンを得る方法が研究されてきた。図2(a)は、ブロック形の物質にレーザーを照射した場合の、衝撃波の伝播を模式図で表したものである。この場合、衝撃波はその強度を一定に保ちながら、レーザーの進行方向に伝播する。ここで、衝撃波の強度というのは、衝撃波の中の電荷分布の不均一性から生じる電場の大きさのこ

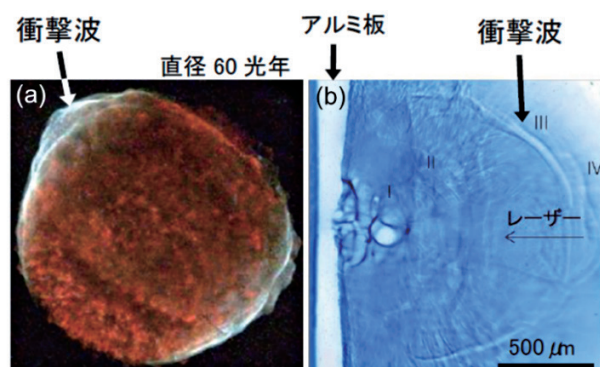
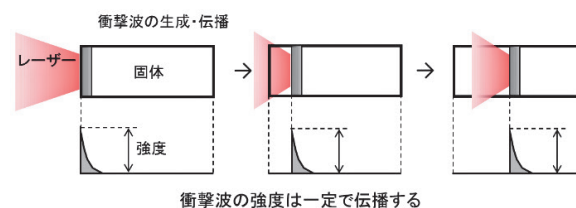


図1 超新星残骸とレーザープラズマ中に見られる衝撃波  
(a) 超新星残骸 SN1006 が衝撃波をともなって宇宙空間へ膨張していく様子。膨張表面で衝撃波による粒子加速が起こっている。(b) アルミ板(厚さ $\approx 25\ \mu\text{m}$ )に高強度レーザー(矢印の方向に伝播)を照射することでプラズマ中に発生した衝撃波。Romagnani L., et al., (2008)<sup>1)</sup>より抜粋。

#### (a) 固体ターゲット



#### (b) クラスターターゲット

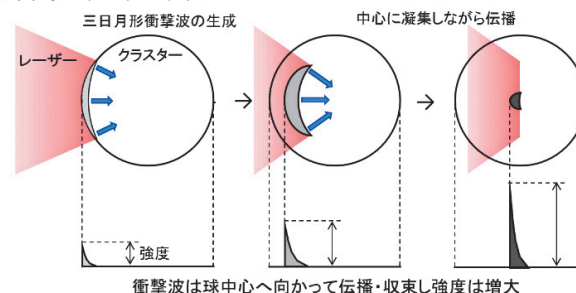


図2 高強度レーザーを用いて人工的に発生させたプラズマ中の衝撃波の伝播の模式図

(a) ブロック形の物質にレーザー照射した場合、衝撃波はその強度をほぼ一定に保ったまま伝播する。(b) 球形の物質(クラスター)にレーザー照射した場合、衝撃波は球中心に向かって伝播・収束し、その強度は増強される。

とを指している。一方、“球形”の物質にレーザーを照射した場合には、図2(b)に示すように、球表面のレーザー照射側に発生した衝撃波は、球の中心に向かって伝播・収束する過程でその強度が増強される。この増強された衝撃波を利用することで、イオンを短時間で効率よく加速できると考えられる。

今回、筆者らは、レーザーを照射するターゲットとして水素クラスターに注目した。水素クラスターとは、直径が $1\ \mu\text{m}$ 程度の球形の固体水素のことである。レーザーは通常、電子密度が大きな固体( $\sim 10^{23}\ \text{cm}^{-3}$ )の内部に進入することはできない。しかし、固体水素の電子密度は $\sim 10^{22}\ \text{cm}^{-3}$ と通常の固体よりも1桁低いため、ペタワット( $\text{PW}=10^{15}\ \text{W}$ )級の世界で最も高強度のレーザーを使うことで、相対論効果(電子が光速に近い速度で動くときに、電子の質量が大きくなる効果)により、レーザーは水素クラスターの内部に進入できるようになる。したがって、水素クラスターとペタワット級高強度レーザーを組み合わせれば、衝撃波が増強される効果と相対論効果が相乗することで、陽子を短時間で効率よく加速する新たなメカニズムの発現が予想される。

#### 4 CSBA (Converging Shock-induced Blow-off Acceleration) 加速

この考えのもと、筆者らは、相対論的プラズマ粒子コード EPIC3D<sup>4)</sup> を用いて三次元の計算機シミュレーションを実施し、 $10^{10}$  個程度の水素分子からなる半径  $0.8 \mu\text{m}$  の“球形”物質である水素クラスター（以下、「クラスター」）に、集光強度  $1.0 \times 10^{22} \text{ W/cm}^2$  のペタワット級高強度レーザーを照射した際に起こる現象を調べた。パラメータは、量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所（量研関西研）で整備・開発が進んでいる、高強度レーザー J-KAREN-P<sup>5,6)</sup>、及び、マイクロメートルサイズの水素クラスターターゲット<sup>7,8)</sup> を用いた陽子加速を想定した。

クラスターにレーザー光を照射すると、レーザー光の圧力がクラスター表面を強く押すことによって、クラスター表面のレーザー照射側に三日月形の衝撃波が生成する（図 3(a)）。この衝撃波は、クラスターが球形であるという特性から、クラスター中心に向かって伝播・収束する過程でその強度が増強される（図 3(b)(c)）。これにより、衝撃波加速が開始され、エネルギーの揃った陽子が生成する（図 4. (a)）。この際、加速された陽子は、前述の相対論効果の影響を受けて速度の増した衝撃波で更に後押しされて圧縮される。この圧縮により、エネルギーの揃い具合が向上した品質の良い陽子線の塊（バンチ）が生成し、この陽子線バンチは、衝撃波による電場を受けながら、大砲から砲弾が打ち出されるように、クラスター中心からレーザー進行方向へ向かって打ち出される（図 4. (b)）。

衝撃波から打ち出された陽子線バンチは、クラスター内部のプラズマが作る電場で更に追加速されてクラスター表面から飛び出す（図 5）。この飛び出した陽子線バンチは、クラスター外部の電場でも更に追加速され続けることで、最終的に  $0.3 \text{ GeV}$ （光速

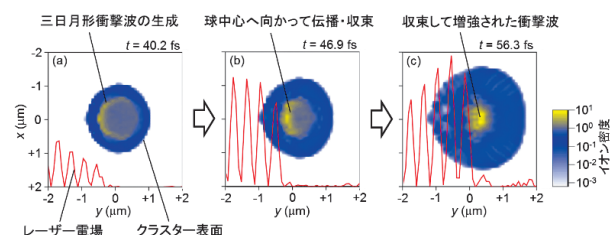


図 3 イオン密度分布（二次元図）の時間発展の様子

(a) レーザー照射によってクラスター表面に三日月型の衝撃波が生成し、(b) クラスター中心へ向かって収束しながら伝播し、(c) クラスター中心で収束し、その強度は増強される。Matsui R., et al., (2019)<sup>2)</sup> より抜粋。

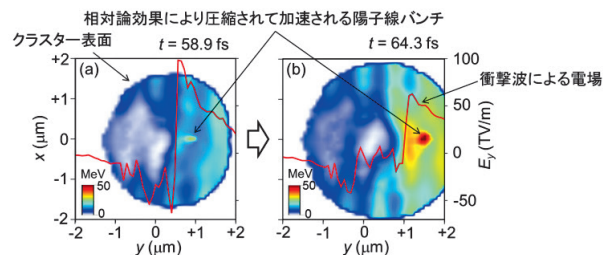


図 4 イオンエネルギー分布（二次元図）

衝撃波で加速されると同時に相対論効果で圧縮された陽子線バンチが、レーザー進行方向（+y 方向）へ加速されている。Matsui R., et al., (2019)<sup>2)</sup> より抜粋。

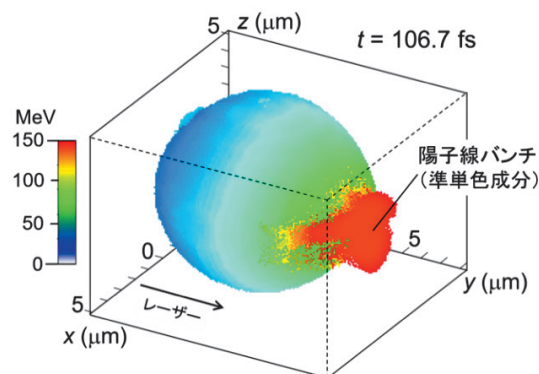


図 5 イオンエネルギー分布（三次元図）

エネルギーの揃った陽子線バンチが、クラスター内部から外部に向かって飛び出し、レーザー進行方向（+y 方向）へ加速されている。Matsui R., et al., (2019)<sup>2)</sup> より抜粋。

の 65%に相当) のエネルギーのよく揃った（エネルギー幅約 10%）指向性の高い（発散角約  $5^\circ$ ）陽子線バンチが発生することが明らかになった（図 6(a) 実線）。筆者らは、衝撃波加速の原理に基づくこれら一連の素過程（衝撃波の増強→衝撃波加速→相対論効果による圧縮→クラスター内部/外部での追加速）が多段階的に同期された本加速メカニズムを、求心衝撃波の生成と崩壊・飛散過程で形成される大きな電場を利用した加速という意味を込めて、Converging Shock-induced Blow-off Acceleration (CSBA) と名付けた。

最後に、クラスター半径、及び、レーザーの集光強度を変化させた場合に、得られるイオンエネルギーの最大値とエネルギーの揃い具合がどのように変化するかについて調べた。レーザーの集光強度を  $1.0 \times 10^{22} \text{ W/cm}^2$  に保ってクラスターの半径を変化させた場合、半径を小さく ( $0.6 \mu\text{m}$ ) すると CSBA 加速自体が起こらず、準単色（エネルギーの揃った）成分が観測されなかった（図 6(a) 点線）。一方、半径を大きく ( $1.0 \mu\text{m}$ ) すると、半径が  $0.8 \mu\text{m}$  の場合に比べてエネルギーの揃い具合は悪くなるもの



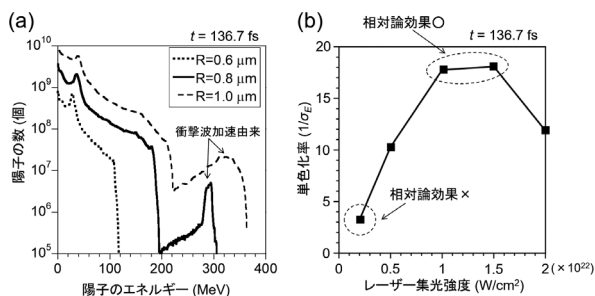


図6 陽子線のエネルギースペクトルと相対論効果のレーザー強度依存性

(a) クラスター半径を変化させた場合の、最終的な陽子線のエネルギースペクトル。半径  $0.8 \mu\text{m}$  の場合、 $0.3 \text{ GeV}$ （光速の65%に相当）のエネルギーのよく揃った指向性の高い陽子線バンチが発生している。(b) 相対論効果のレーザー強度依存性。

の、CSBA 加速により  $0.33 \text{ GeV}$  の準単色陽子線が発生することが分かった（図6(a)，破線）。

次に、クラスターの半径を  $0.8 \mu\text{m}$  に保ってレーザーの集光強度を変化させた場合、集光強度を下げると前述の相対論効果が効かなくなるため、単色化率は小さくなり、一方で集光強度を上げても単色化率はやや小さくなることが分かった（図6.(b)）。ここで、単色化率とは、エネルギーの揃い具合を示す物理量であり、エネルギー幅の逆数をとった値で定義される。すなわち、エネルギーがよく揃っている（エネルギー幅が小さい）ほど、単色化率は大きくなる。これらの結果は、水素クラスターを用いた場合、レーザーの集光強度が  $1.0 \times 10^{22} \text{ W/cm}^2$ 、かつ、クラスターの半径が  $0.8 \mu\text{m}$  付近に、CSBA 加速が最も効果的に働くパラメータ領域が存在することを示している。

## 5 将来展望

本稿では、球形の物質（水素クラスター）に高強度レーザーを照射することで、クラスター内に衝撃波を立てるといって、衝撃波加速の原理に基づく新しいイオン加速メカニズム（CSBA）により、光速の65%に相当する  $0.3 \text{ GeV}$  の準単色陽子線を発生させるメカニズムについて紹介した。

将来展望として、レーザーだけで陽子を光速近くまで加速する技術の実現に向けた可能性をあげることができる。これまで現状のレーザー技術の範囲内では、高エネルギー化と単色化とを高いレベルで同時に達成し、サブ  $\text{GeV}$  領域の光速近くに迫るイオンを加速することは困難であった。本稿で紹介

した加速手法がうまく働けば、従来型加速器を小型化してコストを下げる新しい加速手法の研究が促進されると期待できる。また、逆に、宇宙線の加速機構についての理解の一助になることも期待される。

もう1つの将来展望は、陽子線の応用にある。筆者らが発見した手法で発生する陽子線は、不純物を全く含まない超高純度陽子線となる。このような超高純度陽子線は、従来のレーザープラズマイオン加速の手法では、発生させることができなかった。具体的な応用例としては、本研究の手法で発生する陽子線のエネルギーが  $0.3 \text{ GeV}$  に達することから、粒子線がん治療装置の陽子線源としての応用が期待される。また、近年、水素エネルギーや燃料電池の普及に伴い、水素エネルギー材料の水素脆化が顕在化しているが、水素脆化のメカニズムは未だ解明されていないのが現状である。加えて、原子力材料の放射線損傷のメカニズムも未だ解明されていない。このような人間の社会生活の安全、安心に関わる問題に対して、我々が発見した手法で発生させた陽子線を材料に繰り返し照射してその変化の様子を時事刻々追うことで、水素脆化や放射線損傷のメカニズムを解明してこれらを未然に防ぐ技術の開発へ向けた研究が促進されることが期待できる。

福田らは、既にマイクロメートルサイズの水素クラスターを真空中で実際に発生させる技術の開発に成功しており<sup>7,8)</sup>、量研関西研 J-KAREN-P ペタワットレーザー装置<sup>5,6)</sup>を用いた原理検証を開始している。

## 参考文献

- 1) Romagnani L., *Phys. Rev. Lett.* **101**, 025004 (2008)
- 2) Matsui R., Fukuda Y., Kishimoto Y., *Phys. Rev. Lett.* **122**, 014804 (2019)
- 3) Strickland D., *et al.*, *Opt. Commun.* **56** (3), 219-221 (1985)
- 4) Kishimoto Y., *et al.*, *J. Plasma. Phys.* **72** (6), 971-974 (2006)
- 5) Pirozhkov A. S., *et al.*, *Opt. Express* **25** (17), 20486-20501 (2017)
- 6) Kiriya H., *et al.*, *Optics Letters* **43** (11), 2595-2598 (2018)
- 7) Jinno S., *et al.*, *Opt. Express* **25** (16), 18774-18783 (2017)
- 8) Jinno S., *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **60**, 044021 (2018)

(\*1 京都大学大学院 エネルギー科学研究科,

\*2 量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所)